

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201604002



考虑磨削余量分配的齿轮钢 磨削工艺优化

黄身桂^{1,2}, 栾晓圣², 言兰¹, 陈首虹¹, 姜峰²

(1. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021)

摘要: 以 40CrNiMo 钢为研究对象,对原有磨削工艺进行优化,探讨减少工作台进给次数、去掉半精磨工艺对磨削质量的影响.结果表明:原有粗磨+半精磨+精磨工艺改为粗磨+精磨两道工艺是可行的,且在保持总磨削余量一定的条件下,通过减少工作台进给次数的方法可以降低粗磨过程多次走刀造成的磨削表面硬化,同时提高了加工效率;粗磨产生的磨削表面硬化对降低半精磨、精磨后的磨削表面粗糙度有利,但表面硬化伴随着磨削亚表层金相组织变化和残余应力等不利因素.

关键词: 磨削工艺; 余量分配; 加工效率; 40CrNiMo 钢; 表面质量

中图分类号: TG 5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2016)04-0401-05

Optimization on Grinding Process of Gear Stell Considering Allowance Distribution

HUANG Shengui^{1,2}, LUAN Xiaosheng², YAN Lan¹,
CHEN Shouhong¹, JIANG Feng²

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The effects of reducing frequency of strokes and eliminating semi-fine grinding process on the grinding quality of 40CrNiMo gear steel were investigated. It was found removal of the semi-fine grinding process from existing coarse/semi-fine/fine processing sequence is feasible and at a constant total grinding allowance, a decrease of strokes number can successfully reduce surface hardening and subsequently improve the machining efficiency. It was also evidenced that the surface hardening left by coarse grinding can reduce the surface roughness of semi-fine and fine grinding however the undesirable sub-surface damage and residual stress would associate. These findings are of practical significance for optimization of grinding process.

Keywords: grinding process; allowance distribution; grinding efficiency; 40CrNiMo steel; surface quality

齿轮钢材料种类繁多,综合力学性能要求高,通常采用磨削加工.然而,齿轮钢磨削加工过程中磨削温度高、砂轮磨损快、加工硬化趋势强,往往导致磨削加工效率低、表面质量差^[1-3],使加工质量和加工效率成为一对突出矛盾,进而导致生产成本大幅度提高^[4-6].为此,研究齿轮钢磨削工艺优化,在保证磨

收稿日期: 2016-05-20
通信作者: 姜峰(1981-),男,副教授,博士,主要从事高效精密加工和先进制造技术的研究. E-mail: jiangfeng@hqu.edu.cn.
基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51405168);福建省自然科学基金面上资助项目(2016J01237);华侨大学高层次人才科研启动项目(13Y0385, 13Y0386)

削加工质量的同时提高加工效率,就具有十分重要的现实意义. 已有研究可发现,磨削余量的分配对提高加工效率和表面质量起着至关重要的作用,合理的磨削余量分配对降低生产成本有明显效果^[7-19]. 尽管目前针对齿轮钢的磨削加工已有大量研究,但基于提高加工效率和表面质量,考虑磨削余量分配对齿轮钢的磨削工艺优化的研究却鲜有提及. 本文研究通过重新分配磨削余量对齿轮钢的磨削工艺进行优化,通过测量磨削表面粗糙度、表层/亚表层显微硬度、磨削表面残余应力等多种手段评价磨削表面完整性,在获得良好的加工表面质量的同时进一步提高加工效率^[20].

1 磨削试验设计

1.1 试验条件

40CrNiMo 齿轮钢,热处理后硬度为 HRC52~57,其化学成分及基本力学性能分别如表 1,2 所示. 表 1,2 中: w 为质量分数; σ_b 为抗拉强度; σ_s 为屈服强度; ψ 为断面收缩率; E 为弹性模量; ν 为泊松比.

平面磨削试样尺寸为 30 mm×15 mm×10 mm,其中,10 mm 是砂轮宽度方向;30 mm 是工件进给方向;15 mm 是磨削深度方向. 磨削示意图,如图 1 所示.

表 1 齿轮钢 40CrNiMo 的化学成分
Tab. 1 Chemical elements of gear steel 40CrNiMo %

w_C	w_{Si}	w_{Mn}	w_{Cr}	w_{Mo}	w_{Fe}
0.35~0.45	0.15~0.40	0.40~0.70	1.00~1.50	0.50~0.80	Balance

表 2 齿轮钢 40CrNiMo 的基本力学性能
Tab. 2 Mechanical properties of gear steel 40CrNiMo

σ_b /GPa	σ_s /GPa	ψ /%	E /MPa	ν
2.0	1.8	35	206	0.25~0.30

磨削试验使用的磨床型号为 BLOHM-Planomat HP408 型高速精密平面成型磨床(德国 Schleifring 公司),机床主轴功率达到 24.5 kW,主轴转速为 0~8 000 r·min⁻¹(无级调速),最大砂轮(直径×宽度×孔径)为 400 mm×80 mm×127 mm,磨削面积为 800 mm×400 mm,工件进给速度(v_w)可调范围为 30~40 000 mm·min⁻¹. 砂轮型号为 PSX 1 400×50×160,SA80J9V50(江西南昌精益磨料磨具有限公司),最大线速度(v_s)为 35 m·s⁻¹. 每进行一组试验前都对砂轮进行修整.

1.2 磨削工艺参数

由于使用砂轮的最高线速度受限,因此,磨削工艺参数的改进方案以某公司齿轮磨削典型工艺参数为基础进行改进,主要包括去掉半精磨工艺和改变工作台进给速度. 即在保持金属去除量一致的前提下,设计改进磨削工艺方案两种,每个工艺方案有多个工件进给速度. 改进前后的磨削工艺参数,如表 3 所示. 表 3 中: v_s 为砂轮线速度; v_w 为工作台进给速度; n 为工作台进给次数; $S_C, S_{HF}, S_F, S_{tot}$ 分别表示粗磨、半精磨、精磨进刀量和总进刀量;改进前磨削工艺为每组 2 个试样,共 2 个试样,而改进后工艺 I, II 为每组 1 个试样,共 5 个试样. 3 种磨削方案下磨削余量分配对比,如图 2 所示. 图 2 中: s 为余量.

表 3 齿轮磨削原有工艺与改进工艺
Tab. 3 Initial grinding processes and improved grinding processes

工艺	改进前工艺				改进工艺 I				改进工艺 II			
	S_{tot} /mm	n	v_w /mm·min ⁻¹	v_s /m·s ⁻¹	S_{tot} /mm	n	v_w /mm·min ⁻¹	v_s /m·s ⁻¹	S_{tot} /mm	n	v_w /mm·min ⁻¹	v_s /m·s ⁻¹
粗磨	0.64	4	4 000	35	0.64	3	3 000; 4 000; 5 000; 6 000; 7 000	35	0.64	2	2 000; 3 000; 4 000; 5 000; 6 000	35
半精磨	0.03	1	3 500	35	—	—	—	—	—	—	—	—
精磨	0.01	1	2 000	35	0.04	1	2 000	35	0.04	1	2 000	35

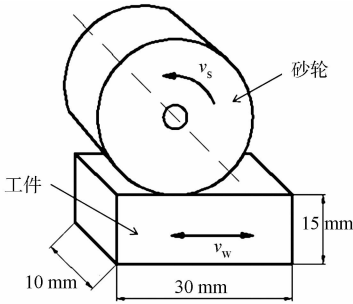


图 1 磨削示意图
Fig. 1 Grinding schematic

续表
Continue table

改进前	第1次进给顺	$S_C=0.08$	第1次进给逆	$S_C=0.08$	第1次进给顺	$S_{HF}=0.01$	第1次进给逆	$S_{HF}=-0.5$
	第2次进给顺	$S_C=0.08$	第2次进给逆	$S_C=0.08$	第1次进给顺	$S_F=0.01$	第1次进给逆	$S_F=-0.5$
	第3次进给顺	$S_C=0.08$	第3次进给逆	$S_C=0.08$				
	第4次进给顺	$S_C=0.08$	第4次进给逆	$S_C=0.08$				
改进I	第1次进给顺	$S_C=0.18$	第1次进给逆	$S_C=0.18$	第1次进给顺	$S_F=0.03$	第1次进给逆	$S_F=0.01$
	第2次进给顺	$S_C=0.09$	第2次进给逆	$S_C=0.09$				
	第3次进给顺	$S_C=0.05$	第3次进给逆	$S_C=0.05$				
改进II	第1次进给顺	$S_C=0.24$	第1次进给逆	$S_C=0.24$	第1次进给顺	$S_F=0.03$	第1次进给逆	$S_F=0.01$
	第2次进给顺	$S_C=0.08$	第2次进给逆	$S_C=0.08$				

2 试验结果与分析

2.1 表面粗糙度

采用 ZYGO 白光干涉仪进行粗糙度的测量,得到不同磨削工艺条件下已加工表面的表面粗糙度(R_a),如表 4 所示.随机测量 6 个位置取平均值,取样面积为 $3.09\text{ mm}\times1.42\text{ mm}$.其中, 3.09 mm 是工件进给方向; 1.42 mm 是砂轮宽度方向;物镜为 10 倍;测量模式为 VSI;全解析度,平行于测量表面横向分辨率 $1.1\text{ }\mu\text{m}$,垂直于测量表面方向分辨率 0.001 nm ,拼接区域重合度 10%.

由表 4 可知:随着粗磨过程工件进给速度的增加,精磨后粗糙度值呈现下降的趋势.主要原因是随着工件进给速度的增加,粗磨后表面的硬度有增加的趋势,材料的硬度越大,相同磨削工艺参数条件下,精密磨削得到的表面粗糙度值越低.因此,粗磨过程中一定的加工硬化对于最终磨削表面粗糙度的降低是有利的.

表 4 不同磨削方案下的表面粗糙度

Tab. 4 Surface roughness of different grinding processes

组别	原始工艺	I-3 000	I-4 000	I-5 000	I-6 000	I-7 000	II-2 000	II-3 000	II-4 000	II-5 000	II-6 000
$R_a/\mu\text{m}$	1.479	1.106	1.634	1.475	1.364	0.980	2.077	1.777	1.532	1.120	1.842

2.2 磨削表层/亚表层的维氏硬度变化

利用离磨削表面不同深度的维氏硬度量化磨削表面的变质情况,测点分布情况如图 3 所示.图 3 中:前 5 个点间隔 $30\text{ }\mu\text{m}$;后 10 个点间隔 $60\text{ }\mu\text{m}$;加载载荷为 0.5 N ;加载时间为 15 s .测量 3 个位置取平均值,结果如图 4 所示.图 4 中: h 为亚表面深度.

由图 4 可知:在磨削工艺改进方案 I 中,粗磨引起的磨削表面硬化层在精磨过后基本可以去除;而磨削工艺改进方案 II 中,粗磨引起的磨削表面硬化层在精磨过后,只有工件进给速度 $5\text{ }000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的试验组基本去除,而其他试验组均有一定的硬化层残留.磨削变质层(硬化层+软化层)深度最小为 $450\text{ }\mu\text{m}$ (磨削工艺改进方案 I,工件进给速度 $7\text{ }000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$),最大为 $840\text{ }\mu\text{m}$ (磨削工艺改进方案 I,工件进给速度 $3\text{ }000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$;磨削工艺改进方案 II,工件进给速度 $3\text{ }000,4\text{ }000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$).

2.3 磨削残余应力

磨削残余应力测试在 X 射线残余应力测试仪上进行,基本测试参数:Cr 靶;电压为 20 kV ;电流为 5 mA ;衍射晶面为 $\{211\}$;弹性模量为 210 GPa ;泊松比为 0.3 ;无应力衍射角为 156.4° ; ψ 选用 $0^\circ, \pm 25^\circ, \pm 35^\circ, \pm 45^\circ$.测量两个方向的残余应力,其中, X 方向测得的是工件进给方向的残余应力; Y 方向测得的是磨削宽度方向的残余应力.采用互相关法确定 X 射线衍射峰的位置,进而计算峰偏移和残余应力.

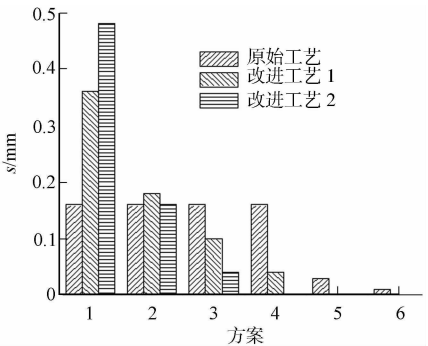


图 2 不同方案下磨削余量分配对比
Fig. 2 Allowance distribution of different grinding processes

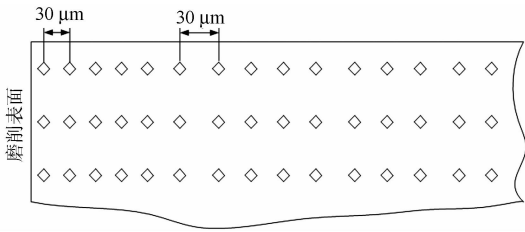


图 3 测点位置示意图
Fig. 3 Measurement of vickers hardness

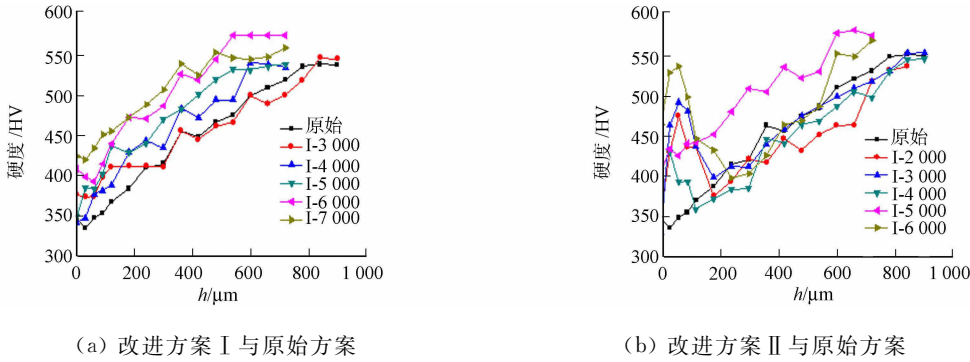


图 4 工艺改进前后的磨削亚表层硬度对比

Fig. 4 Comparison of surface hardness between initial and improved grinding process

图 5 为残余应力的测量位置,在磨削宽度方向上等距测量 5 个点的残余应力.不同磨削工艺得到的工件进给方向和磨削宽度方向的残余应力,如图 6~7 所示.图 6,7 中: σ 为残余应力.

由图 6,7 可知:磨削残余应力以压应力为主,只有磨削改进工艺方案 I 中工件进给速度为 $7\,000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的已加工表面,工件进给方向的残余应力呈现拉应力状态.过高的压应力往往伴随金相组织的变化,对零件的使用性能会有较大影响.因此,磨削改进工艺方案 II 中工件进给速度为 $2\,000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的已加工表面性能不可靠.此外,磨削宽度方向上 5 个点的磨削残余应力的一致性越高越好.一致性越高,说明表面的应力稳定性越好,长时间时效后的应力释放均匀,变形均匀.磨削原始工艺、磨削改进工艺方案 I,工件进给速度为 $5\,000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$;磨削改进工艺方案 II,工件进给速度 $6\,000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的残余应力状态较好.

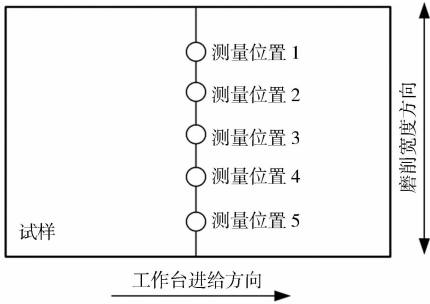


图 5 残余应力的测量位置

Fig. 5 Measurement of residual stress

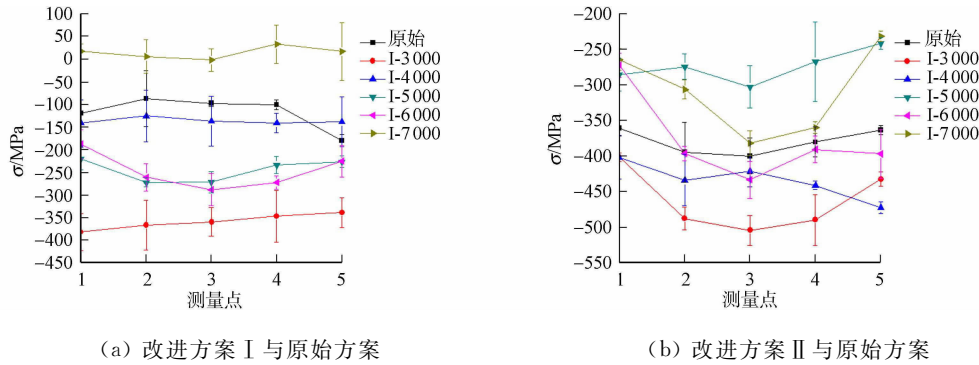


图 6 工艺改进前后的工件进给方向残余应力的比较

Fig. 6 Comparison of residual stress between initial and improved grinding

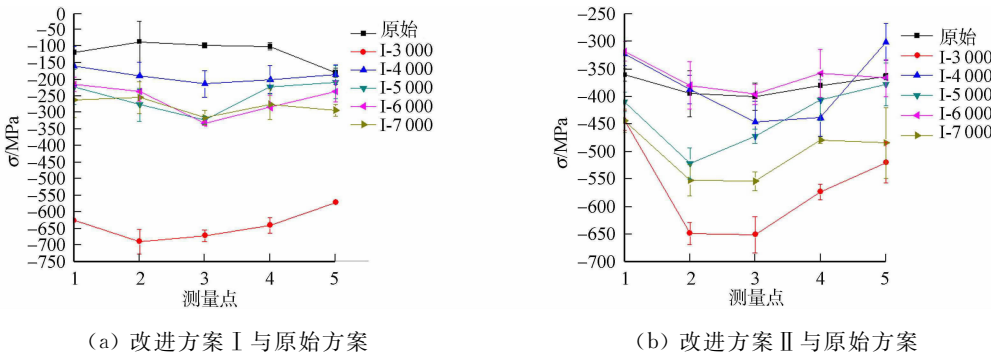


图 7 工艺改进前后的磨削宽度方向残余应力的比较

Fig. 7 Comparison of residual stress between initial and improved grinding process

3 结论

1) 粗磨产生的磨削表面硬化对降低半精磨、精磨后的磨削表面粗糙度有利,但是表面硬化伴随着磨削亚表层金相组织变化和残余应力等不利因素.因此,粗磨工艺参数的优化有实际意义.

2) 在保持金属去除量一致的前提下,通过减少工作台进给次数的方法可以降低粗磨过程多次走刀造成的磨削表面硬化.同时,提高了加工效率.

3) 根据试验结果可以发现,磨削工艺改进方案Ⅱ中,工件进给速度 $5\,000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 试验组得到的磨削表面综合质量最优,表面质量各项指标均超过原始工艺.同时,粗磨的金属去除率提高了150%.

参考文献:

- [1] BESWICK J M. Bearing steel technology[M]. West Conshohocken:ASTM,2002:533.
- [2] BHADURI D,KUMAR R,CHATTOPASHYAY A K. On the grindability of low-carbon steel under dry, cryogenic and neat oil environments with monolayer brazed cBN and alumina wheels[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2011(57):927-943.
- [3] LI Xinmin,OLOFSSON U. FZG gear efficiency and pin-on-disc frictional study of sintered and wrought steel gear materials[J]. Tribology Letters,2015,60(9):1-10.
- [4] JANAKIRAMAN V,SARAVANAN R. Concurrent optimization of machining process parameters and tolerance allocation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2010,51(1/2/3/4):357-369.
- [5] ZHANG Xueping,LIU C R,YAO Zhenqiang. Experimental study and evaluation methodology on hard surface integrity[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2007,34(1/2):141-148.
- [6] XU Xipeng,YU Yiqing,XU Hongjun. Effect of grinding temperatures on the surface integrity of a nickel-based superalloy[J]. Journal of Materials Processing Technology,2002,129(1/2/3):359-363.
- [7] 罗庆洪,李春志,娄艳芝,等. 磨削工艺对渗碳 M50NiL 钢表面变质层微观结构和性能及疲劳性能影响[J]. 金属学报,2012(2):194-198.
- [8] 张雪萍,王和平,卢光辉,等. 轴承钢顺次磨削表面残余应力离散度试验研究[J]. 机械工程学报,2010,46(15):89-94.
- [9] 杨洪春. 33CrNi2MoV 钢的磨削加工[J]. 现代制造技术与装备,2014(5):48-49.
- [10] 时海芳,刘波,李海玉,等. 磨削深度对 42CrMo 钢磨削强化层的影响[J]. 金属热处理,2012,37(1):96-98.
- [11] 刘菊东,王贵成,陈康敏. 磨削深度对 65Mn 钢磨削硬化层的影响[J]. 农业机械学报,2005,36(8):135-138.
- [12] ELI S N,ASILTÜRK L,ELIK L. Determining the optimum process parameter for grinding operations using robust process[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2012,26(11):3587-3595.
- [13] GUO Yansong,DUFLOU J R,LAUWERS B. Energy-based optimization of the material stock allowance for turning-grinding process sequence[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2014,75(1/2/3/4):503-513.
- [14] YEO S H,NGOI B K A,CHEN H. Process sequence optimization based on a new cost-tolerance model[J]. Journal of Intelligent Manufacturing,1997,9(1):29-37.
- [15] 陈凯. CSS-42L 合金钢的磨削加工性研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013:47-48.
- [16] 彭宁,李春艳,郭璐. 数控成形磨齿机测头自动对刀技术和余量分配的研究[J]. 机械工程师,2015(1):200-201.
- [17] 沈南燕. 大型数控切点跟踪曲轴磨床智能加工工艺及策略研究[D]. 上海:上海大学,2011:31-53.
- [18] 万林林. 氮化硅陶瓷回转曲面典型零件高效精密磨削工艺实验与理论研究[D]. 长沙:湖南大学,2012:100-113.
- [19] 杨立志,刘洋,陆永超,等. 提升起重机变幅油缸活塞杆磨削质量与效率的新工艺方法的探索与研究[J]. 液压气动与密封,2014(11):71-72.
- [20] 任敬心,康仁科,王西彬. 难加工材料磨削技术[M]. 北京:电子工业出版社,2011:196-232.

(责任编辑:黄仲一 英文审校:崔长彩)